مدل سازی و بررسی پارامتریک سیستم ترکیبی پیل سوختی اکسید جامد و میکروتوربین گازی

عاطفه بهزادی فروغ[۱]، رامین روشندل[۲]

تاریخ دریافت مقاله:
۹۱/۸/۳۰
تاریخ پذیرش مقاله:
۹۱/۱۱/۳۰

چکیده:

برای بهبود عملکرد و افزایش بازده میکروتوربین‌های گازی می توان آنها را با پیل سوختی اکسید جامد[۳] (SOFC) که دمای عملکردی بالایی دارد، ترکیب نمود. در این مقاله، مدل یک سیستم ترکیبی میکروتوربین گازی و پیل سوختی اکسید جامد ارائه شده است. ظرفیت پیل سوختی نقش موثری در راندمان کلی سیستم ترکیبی دارد. به همین دلیل، اثر تعداد سلول های پیل سوختی اکسید جامد در نظر گرفته شده (ظرفیت پیل سوختی)، بر عملکرد سیستم ترکیبی مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین این مقاله اثر سایر پارامترهای مهم و کلیدی را در سیستم تولید توان ترکیبی پیل سوختی اکسید جامد و میکروتوربین گازی مورد ارزیابی قرار می دهد. بررسی و ارزیابی اثر پارامترهای کلیدی این سیستم، در حضور قید محدود کننده دمای گازهای ورودی به میکروتوربین، انجام می‌شود. نتایج نشان می دهد که با افزایش ظرفیت پیل سوختی در سیستم ترکیبی، راندمان کل این سیستم در ابتدا افزایش می‌یابد، اما با افزایش بیشتر ظرفیت پیل سوختی، آهنگ افزایش بازده کل سیستم کمتر خواهد بود. همچنین با افزایش ظرفیت پیل سوختی، دمای گازهای خروجی از پیل افزایش یافته و در نهایت، موجب افزایش دمای گازهای ورودی به میکروتوربین[٤] (TIT) می شود. در انتها، تأثیر استفاده از گازهای خروجی از میکروتوربین برای پیش گرمایش سوخت و هوای ورودی به پیل سوختی مورد بررسی قرارگرفته است. نتایج نشان می‌دهد که اعمال مدیریت حرارت بر سیستم و بازیافت حرارت می تواند بازده کلی سیستم ترکیبی را تا ۱۷.۸ درصد افزایش دهد. به این ترتیب، نتایج این پژوهش می‌تواند اطلاعات ارزشمندی را برای مطالعه سیستم ترکیبی پیل سوختی اکسید جامد- میکروتوربین گازی فراهم‌آورد.

کلمات کلیدی:
سیستم ترکیبی، پیل سوختی اکسید جامد، میکروتوربین گازی، مدیریت حرارتی

۱) دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده انرژی furugh۱۳۶۸@gmail.com
۲) هیأت علمی دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده انرژی، (نویسنده مسئول) Roshandel@sharif.edu

۳) Solid Oxide Fuel Cell
۴) Turbine Inlet Temperature

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

۱- مقدمه

پیل‌های سوختی، سیستم‌های الکتروشیمیایی هستند که انرژی شیمیایی موجود در سوخت را به صورت مستقیم و بدون حضور مرحله احتراقی، به انرژی الکتریکی تبدیل می کنند. در نتیجه، این نوع سیستم ها، بسیاری از محدودیت های مربوط به موتورهای احتراقی را نخواهند داشت و دارای بازده الکتریکی بالایی در تبدیل سوخت به انرژی الکتریکی خواهند بود. در میان انواع پیل های سوختی، پیل سوختی اکسید جامد یکی از بهترین گزینه ها برای تولیدات پراکنده توان می باشد. دمای عملکردی آنها بین ۶۰۰°c تا ۱۱۰۰°c می‌باشد [۱]. پیل سوختی اکسید جامد به علت داشتن بازده الکتریکی بالا گزینه بسیار مناسبی برای استفاده در سیستم ترکیبی می‌باشد. با توسعه سیستم های تولید توان پراکنده، میکروتوربین گازی (MGT)، به صورت سریع توسعه پیدا کرده است. از مهمترین ویژگی‌های MGT که آن را از توربین های گازی متداول متمایز می‌کند، می‌توان به دارا بودن بازده بالا در توان پایین، بالا بودن دور موتور آن و همچنین امکان تامین تقاضای بار جزیی اشاره کرد که باعث می شود این سیستم بتواند با سیستمی مانند SOFC ترکیب شود.

سیستم‌های ترکیبی پیل سوختی اکسید جامد طی سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته اند [۴-۲] و به صورت جامع توسط چدی و باو و همکارانشان [۶ و ۵] بررسی شده اند. ژانگ و همکارانش [۷] راهبردهای مختلف را برای ترکیب سیستم SOFC با دیگر سیستم‌های تولید توان مورد بحث قرار دادند. این راهبردها به طور کلی به سه بخش اصلی تقسیم شده‌اند که به صورت ترکیب گرمایی مستقیم، ترکیب گرمایی غیر مستقیم و ترکیب سوختی می‌باشد. در ترکیب گرمایی مستقیم، دو یا چند سیستم تولید توان، سیال کارکردی خود را با هم به اشتراک می‌گذارند. در ترکیب گرمایی غیر مستقیم، سیال‌های کارکردی سیستم‌ها به صورت مجزا در نظر گرفته می‌شود و تنها حرارت آنها از طریق مبدل حرارتی[۱] بین سیستم‌های تولید توان منتقل می‌شود. همچنین در ترکیب سوختی، سیستم تولید هیدروژن یا احیا کننده سوخت یکی از اجزای ساختار سیستم ترکیبی می باشد. توان تولیدی در اغلب سیستم‌های ترکیبیSOFC-GT در بازه چند ده تا چند صد کیلووات است [۹ و ۸]. سیستم‌های ترکیبی بزرگتر نیز در چندین مقاله مورد بررسی قرار گرفته‌اند. آرسالیس [۱۰] استک‌های پیل سوختی اکسید جامد با توان ۸.۵ MW را در سیستم ترکیبیSOFC-GT در نظر گرفت. مولر و همکارانش [۱۱] در تحقیقات خود با استفاده از یک مدل دینامیک نشان دادند که سیستم ترکیبیSOFC-GT قابلیت پاسخگویی به نیازهای متغیر با زمان مصرف کننده را دارد. یانگ و همکارانش [۱۲] سیستم ترکیبی SOFC-GT را در حالت عملکردی بار جزیی، در سه وضعیت کنترلی (کنترل سوخت، کنترل سرعت چرخش توربین و کنترل دریچه هدایت کننده دبی سوخت

۱) Heat Exchanger

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

ورودی به توربین[۱]) مورد ارزیابی قرار دادند. کلازی و همکارانش [۱۳] آنالیز اگزرژی را بر روی سیستم ترکیبی پیل سوختی اکسید جامد و میکروتوربین گازی پیاده کردند. لای و همکارانش [۱۴] سیستم ترکیبیSOFC-MGT را با روش‌های تجربی مورد بررسی قرار دادند. مطالعه بر روی سیستم تولید توان ترکیبیSOFC-MGT به صورت گسترده‌ای انجام شده و هم اکنون نیز تلاش‌هایی در زمینه توسعه این سیستم ترکیبی وجود دارد. به عنوان یک فناوری پیشنهادی، سیستم تولید توان ترکیبیSOFC-MGT می‌تواند پاسخگوی تقاضای رو به رشد سیستم‌های انرژی تولید پراکنده با بازده بالاتر و تاثیرات زیست محیطی کمتر باشد.

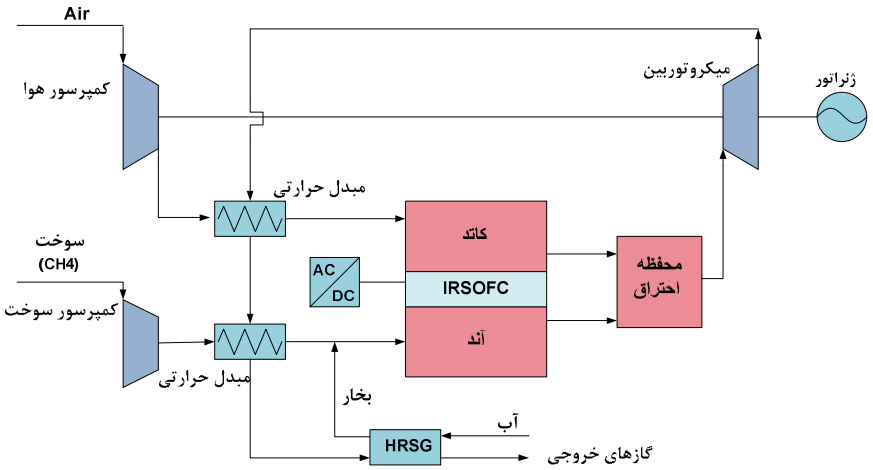
اگرچه تحقیقات زیادی بر روی سیستم ترکیبیSOFC-MGT وجود دارد، اما اثر تغییر ظرفیت پیل سوختی اکسید جامد (تعداد سلول‌ها)، بر راندمان کلی سیستم ترکیبی مورد ارزیابی قرار نگرفته است. همچنین مقالات کمی پارامتر دمای ورودی توربین (TIT) را به عنوان شرایط قیدی، هنگام بررسی سایر پارامترهای سیستم اعمال کرده‌اند. در مقایسه با توربین‌های گازی متداول، TIT در میکروتوربین‌ها، به دلیل محدودیت فناوری در دسترس برای ساخت میکروتوربین (بویژه پره‌های آن) از دمای گازهای ورودی به توربین گازی متداول بسیار کمتر است. در این مقاله، اثر تعداد سلول‌های پیل سوختی اکسید جامد در نظر گرفته شده (ظرفیت پیل سوختی)، بر عملکرد سیستم ترکیبی مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین نقش و تأثیر سایر پارامترهای کلیدی سیستم ترکیبیSOFC-MGT، با در نظر گرفتن TIT به صورت یک پارامتر حدی، بر روی عملکرد سیستم ترکیبی ارزیابی شده است. سوخت ورودی در این سیستم متان می‌باشد که توسط احیا کننده داخلی[۲]، با استفاده از گرمای آزاد شده توسط واکنش‌های الکتروشیمیایی داخل سلول، هیدروژن مورد نیاز سلول پیل را تأمین می‌کند. در انتها، تأثیر حضور مبدل حرارتی برای بازیافت حرارتی گازهای خروجی از میکروتوربین بررسی می‌شود. نتایج این مقاله، اطلاعات ارزشمندی را برای بهبود این سیستم ترکیبی به دست می‌دهد.

۲- ساختار سیستم ترکیبی پیل سوختی اکسید جامد – میکروتوربین گازی

شکل ۱، ساختار سیستم تولید توان ترکیبی SOFC-MGT را نشان می‌دهد. در این ساختار، پیل سوختی اکسید جامد به عنوان سیستم بالادست و میکروتوربین گازی به عنوان سیستم پایین دست عمل می‌کند، به گونه‌ای که استک پیل سوختی به عنوان یک تامین کننده سوخت برای محفظه احتراق میکروتوربین محسوب می‌شود. در این پروژه، پیل سوختی لوله‌ای SOFC با سوخت ورودی متان و همچنین هوا به عنوان عامل اکسید کننده انتخاب شده است.

۱) Variable inlet guide vane
۲) Internal Reforming

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]



شکل۱) ساختار سیستم تولید توان ترکیبی SOFC-MGT

سوخت و هوای متراکم شده (بعد از عبور از کمپرسور سوخت و هوا)، قبل از ورود به استک پیل سوختی، توسط مبدل‌های حرارتی پیش گرم می‌شوند. گاز متان و هوا به ترتیب به آند و کاتد پیل سوختی وارد و گاز متان در آند پیل سوختی احیا و فرآورده‌های گازی غنی از هیدروژن تولید می‌شود. به همین ترتیب، انرژی الکتریکی و حرارت به عنوان محصولات خروجی از پیل سوختی به دست می‌آید. گازهای داغ خروجی از استک پیل سوختی شامل گاز متان واکنش نداده، گازهای تولیدی در استک پیل سوختی (هیدروژن مصرف نشده، کربن دی اکسید و کربن مونو اکسید) و آب می‌باشند. این گازهای داغ به محفظه احتراق وارد شده و در آنجا با هوای خروجی از کاتد محترق می‌شوند. گازهای حاصل از این احتراق، وارد توربین شده و پس از انبساط، کار لازم برای ژنراتور الکتریکی را فراهم می‌کنند. گازهای خروجی از توربین نیز با عبور از مبدل‌های حرارتی، سوخت و هوای ورودی به پیل سوختی را پیش گرم می‌کنند. گازهای خروجی از مبدل حرارتی سوخت به داخل یک بویلر هدایت می‌شوند تا بخار مورد نیاز برای واکنش‌های احیای سوخت تولید شود. در این مقاله، تاثیر استفاده از مبدل‌های حرارتی و سیستم‌های بازیافت حرارتی بر عملکرد سیستم مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۳- مدل ریاضی سیستم ترکیبی پیل سوختی اکسید جامد – میکروتوربین گازی

۳-۱- مدل پیل سوختی اکسید جامد

۳-۱-۱- مدل احیا کننده داخلی

با ورود گاز متان به پیل سوختی دما بالا و در حضور کاتالیت نیکل، واکنش‌های رفورمینگ[۱] و شیفت[۲] برای احیای گاز متان و تولید هیدروژن در قسمت الکترود آند پیل سوختی انجام می‌شود.

۱) Methane steam-reforming reaction
۲) Shift Reaction

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

معادله واکنش رفورمینگ بخار (۱) و معادله واکنش شیفت (۲) در زیر آورده شده است:

$$CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3H_2 \quad (۱)$$

$$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2 \quad (۲)$$

فرض می‌شود این واکنش‌ها به حالت تعادل شیمیایی رسیده باشند و در این صورت می‌توان ترکیب محتوای گاز خروجی از استک را بر اساس معادلات تعادل شیمیایی (معادلات ۳ و۴) به دست آورد:

$$K_{pr_1} = \frac{P_{CO} \times P_{H_2}^3}{P_{H_2O} \times P_{CH_4}} = \frac{n_{CO} \times n_{H_2}^3}{n_{H_2O} \times n_{CH_4}} \left(\frac{P_{tot}}{P_0}\right)^2 \quad (۳)$$

$$K_{pr_2} = \frac{P_{CO} \times P_{H_2}^3}{P_{H_2O} \times P_{CH_4}} = \frac{n_{CO} \times n_{H_2}^3}{n_{H_2O} \times n_{CH_4}} \left(\frac{P_{tot}}{P_0}\right)^2 \quad (۴)$$

ثابت‌های تعادل KP توسط معادله (۵) در دمای ۸۰۰°C محاسبه می‌شوند. مقادیر ثابت‌های A, B, C, D, E مربوط به معادلات (۳) و (۴) در جدول ۱ ارائه شده است.

$$\log K_p = AT^4 + BT^3 + CT^2 + DT + E \quad (۵)$$

جدول ۱) مقادیر ثابت‌های تعادل واکنش‌های رفورمینگ و شیفت

ضرایب	واکنش رفورمینگ	واکنش شیفت
A	-۲.۶۳۱۲۱×۱۰$^{-۱۲}$	۵.۴۷۳۰۱×۱۰$^{-۱۲}$
B	۱.۲۴۰۶۵×۱۰$^{-۷}$	-۲.۲۷۴۷۹×۱۰$^{-۵}$
C	-۲.۲۵۲۳۲×۱۰$^{-۴}$	۴.۶۳۷۴۲×۱۰$^{-۵}$
D	۱.۹۵۰۲۸×۱۰$^{-۱}$	-۳.۹۱۵۰۰×۱۰$^{-۲}$
E	-۶.۶۱۳۹۵×۱۰	۱.۳۲۰۹۷×۱۰$^{-۱}$

معادلات نیم واکنش‌های الکتروشیمیایی و همچنین واکنش الکتروشیمیایی کلی در پیل سوختی به صورت معادلات (۶، ۷ و ۸) خواهد بود.

$$H_2 + O^{2-} \rightarrow H_2O + 2e^- \quad (۶)$$

$$2e^- + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow O^{2-} \quad (۷)$$

$$H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O \quad (۸)$$

ترکیب گازهای خروجی از استک و ورودی میکروتوربین را می‌توان با حل همزمان سه معادله ثابت‌های تعادل و معادله ضریب مصرف سوخت در استک (معادلات ۱۱-۹) به دست آورد:

$$Kpr = \frac{(x-y)(3x+y-z)}{(n_{CH_4}-x)(n_{H_2O}-X-Y+Z)(n_{CH_4}+n_{H_2O}+2x)} \times \left(\frac{P_{tot}}{P_0}\right)^2 \quad (۹)$$

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

$$Kps = \frac{y(2x+y-z)}{(x-y)(n_{H_2O}-x-y+z)} \quad (۱۰)$$

$$z = U_f(2x + y) \quad (۱۱)$$

از حل سه معادله فوق، سه مجهول x و y و z که به ترتیب نمایانگر میزان متان مصرفی در معادله ۱، میزان کربن مونوکسید مصرفی در معادله ۲ و میزان هیدروژن مصرفی در معادله ۸ می باشند، محاسبه می شوند.

۳-۱-۲- مدل الکتروشیمیایی

چگالی جریان پیل سوختی (i) و ولتاژ نهایی آن توسط معادلات (۱۲ و ۱۳) محاسبه می‌شود:

$$i = \frac{znF}{N_d \times A} \quad (۱۲)$$

$$V = V_{re} - V_a - V_c - V_{IR} - V_{con} \quad (۱۳)$$

ولتاژ نهایی برابر اختلاف ولتاژ مدار باز یا به عبارتی برگشت‌پذیر با جمع تمامی انواع افت‌های ولتاژ است. افت‌های ولتاژ شامل افت فعال‌سازی[۱] در آند و کاتد (VcوVa)، افت ناشی از انتقال جرم[۲] (غلظت Vcon)، و افت اهمیک[۳] (Vohmic) است. ولتاژ برگشت پذیر سلول (Vre) پیل سوختی اکسید جامد به وسیله معادله نرنست[۴] و توسط رابطه (۱۴) به دست می‌آید. افت پتانسیل فعال‌سازی در آند (Va) به علت کوچک بودن جریان داخل آند از طریق معادله (۱۵) به دست می‌آید. افت پتانسیل فعال‌سازی در کاتد (Vc) توسط معادله تافل[۵](معادله ۱۶) و همچنین افت پتانسیل اهمیک (Vohmic) با توجه به معادله (۱۷) به دست می‌آید. مقاومت‌های مواد الکترولیت، آند، کاتد و اتصالات در جدول ۲ آورده شده است.

$$V_{re} = -\frac{\Delta G}{2F} + \frac{RT}{2F} ln\left(\frac{P_{H_2} \times P_{O_2}^{\frac{1}{2}}}{P_{H_2O}}\right) \quad (۱۴)$$

$$V_a = \frac{RT}{nFi_o} i \quad (۱۵)$$

$$V_c = \frac{RT}{\beta nF} \ln\left(\frac{i}{i_o}\right) \quad (۱۶)$$

۱) Activation loss
۲) Concentration loss
۳) Ohmic loss
۴) Nernst
۵) Tatel equation

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

$$V_{IR} = i\sigma_e \times d_e + il\pi\sigma_{ic} \times \frac{d_{ic}}{w_{ic}} + \frac{i\pi l^2}{8}\left(\frac{\sigma_c}{d_c} + \frac{\sigma_a}{d_a}\right) \quad (۱۷)$$

جدول ۲) مقاومت مواد (Ω cm)

σ_{ic}	σ_e	σ_c	σ_a	دما (K)
۱	۵۰	۰.۰۲	۰.۰۰۰۹	۱۰۷۳

افت پتانسیل غلظتی (Vcon) توسط معادله (۱۸) و در نهایت توان خروجی از پیل سوختی اکسید جامد (Wsofc) توسط معادله (۱۹) محاسبه می‌شود. همچنین معادله موازنه انرژی در استک پیل سوختی به صورت معادله (۲۰) می‌باشد.

$$Vcon = -\frac{RT}{nF}\ln\left(1 - \frac{i}{i_L}\right) \quad (۱۸)$$

$$W_{SOFC} = znFV \times \eta_{DA} \quad (۱۹)$$

$$\sum C_{Pi} G_{out,i} T_{out} + W_{sofc} + Q_{loss} = \sum C_{Pi} G_{in,i} T_{in,i} + \sum r_k(-\Delta H_k) \quad (۲۰)$$

۳-۲- مدل میکروتوربین

در این بخش، کمپرسور توسط معادلات (۲۱ و۲۲) مدل‌سازی می‌شود که به ترتیب، نشانگر دمای خروجی از کمپرسور و کار مصرفی کمپرسور می‌باشد. برای مدل‌سازی توربین نیز از معادلات (۲۴ و ۲۳) استفاده شده است. در نهایت، کار خالص میکروتوربین که اختلاف کار تولیدی توربین و کار مصرفی کمپرسور می‌باشد، به صورت معادله (۲۵) بیان می‌شود. پارامترهای مورد استفاده برای مدل‌سازی سیستم مورد نظر در جدول ۳ ذکر شده است.

$$T_2 = T_1\{1 + \frac{1}{\eta_{ac}}[1 - \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{Ka-1}{Ka}}]\} \quad (۲۱)$$

$$W_{ac} = m_a \times C_{p,a}(T_2 - T_1) \quad (۲۲)$$

$$T_4 = TIT\{1 - \eta_{gt}[1 - \left(\frac{P_4}{P_3}\right)^{\frac{1-Ka}{Ka}}]\} \quad (۲۳)$$

$$W_{gt} = (m_a + m_f) \times C_p(TIT - T_4) \quad (۲۴)$$

$$W_{mt} = W_{gt} - W_{ac} \quad (۲۵)$$

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

جدول ۳) مقادیر پارامتر اجزای اصلی سیستم ترکیبی [۱۵]

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
قطر سلول (l)	۱.۹ cm	بازده کمپرسور هوا	۰.۷۸
ضخامت کاتد (d_c)	۰.۱۵ cm	دبی مولی هوای ورودی کمپرسور	۳۱.۸۹ $mols^{-1}$
ضخامت آند (d_a)	۰.۰۱ cm	بازده توربین	۰.۸
عرض اتصالات (w_{ic})	۰.۳ cm	بازده تبدیل کننده DC/AC در SOFC	۹۸.۵٪
ضخامت اتصالات (d_{ic})	۰.۰۱۵ cm	ضریب انتقال (β)	۰.۵
ضخامت الکترولیت (d_e)	۰.۰۱۵ cm	چگالی جریان حدی (i_L)	۸۰۰mA cm^{-2}
ناحیه فعال سلول (A)	۲۶۰ cm^2	چگالی جریان تبادلی آند ($i_{a.}$)	۵۳۰mA cm^{-2}
نسبت فشار میکروتوربین گازی	۳.۸	چگالی جریان تبادلی کاتد ($i_{c.}$)	۲۰۰mA cm^{-2}

۴- پارامترهای کلیدی و معیار ارزیابی عملکرد سیستم

ضریب مصرف سوخت (Uf) که به صورت نسبت سوخت مصرف شده در واکنش‌ها به سوخت فراهم شده توسط کانال تعریف می‌شود، توسط معادله (۲۶) بیان می‌شود. پارامتر نسبت بخار به کربن (rSC) نیز به صورت معادله (۲۷) تعریف می‌شود. در این مقاله، بازده الکتریکی کلی سیستم (ηTOT) به عنوان معیار ارزیابی عملکرد سیستم تولید توان ترکیبی در نظر گرفته شده و توسط معادله (۲۸) بیان می‌شود.

$$U_f = \frac{n^{r}_{H_2}}{n^{tot}_{H_2}} \quad (۲۶)$$

$$rSC = \frac{n_{H_2O}}{n_{CH_4}} \quad (۲۷)$$

$$\eta_{TOTAL} = \frac{W_{SOFC} + W_{MT}}{LHV \times G_f} \quad (۲۸)$$

۵- ارائه نتایج و بحث

۵-۱- اعتبار سنجی

برای اعتبار بخشی مدل ارائه شده، نتایج مدل‌سازی یک سیستم ترکیبی مشابه در مقاله دوان و همکارانش [۱۵] با نتیجه مدل حاضر مقایسه شده است. پارامترهای ورودی مشابهی برای محاسبه عملکرد کلی سیستم ترکیبی، مورد استفاده قرار گرفته است. در جدول ۴ پارامترهای خروجی مدل دوان و همکارانش [۱۵] با نتایج کار حاضر مورد مقایسه قرار گرفته است.

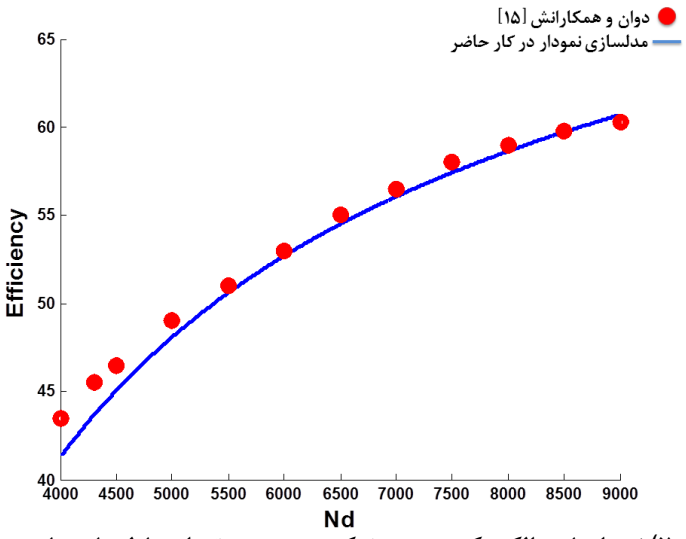
جدول ٤) مقایسه نتایج کار حاضر و مقاله مرجع [۱۵]

پارامترهای اصلی	مقادیر مرجع [۱۵]	نتایج کار حاضر	درصد خطای نسبی
چگالی جریان (A/cm^2)	۰.۲۲۱	۰.۲۱۶	-۲.۲
ولتاژ عملکردی سلول (V)	۰.۷۱۹	۰.۷۲۵	۰.۸۳

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

تعداد سلول‌های پیل سوختی	۵۱۰۰	۵۱۰۰	–
توان SOFC (kW)	۲۰۲.۸	۲۰۳.۶۴۶	۰.۸
توان MGT (kW)	۱۱۲.۸	۱۱۰.۹	-۱.۶

همچنین برای تائید اعتبار مدل، نمودار بازده بر حسب ظرفیت پیل سوختی اکسید جامد با نتایج مدل دوان و همکارانش [۱۵] در شکل ۲ مورد مقایسه قرار گرفته است. برای این کار، نسبت بخار به کربن (rSC=۲.۲)، ضریب مصرف سوخت (Uf=۰.۸) و همچنین دمای عملکردی پیل سوختی (۸۰۰°C)، ثابت در نظر گرفته می‌شود. نمودار شکل ۲ تغییرات بازده کلی سیستم ترکیبی را به ازای تعداد سلول‌های متفاوت نمایش می‌دهد. نقاط قرمز رنگ، نتایج بدست آمده از کار دوان و همکارانش [۱۵] و نمودار آبی رنگ نمودار بدست آمده در این مقاله است که نشان دهنده اعتبار مدل ارائه شده می‌باشد. همانطور که از نمودار مشخص است، قسمت ابتدایی نمودار شیب بیشتری دارد و با افزایش ۲۵ درصدی تعداد سلول‌ها در این ناحیه (۵۵۰۰-۴۰۰۰)، بازده الکتریکی به اندازه ۱۴.۵ درصد افزایش می یابد، در حالی که در قسمت انتهایی نمودار، افزایش تعداد سلول‌ها کمتر مورد توجه خواهد بود، زیرا با افزایش ۲۵ درصدی در تعداد سلول‌ها در این ناحیه (۹۰۰۰-۷۵۰۰)، بازده کلی سیستم تنها ۶.۸ درصد افزایش خواهد یافت. با توجه به اینکه تعداد سلول‌های یک پیل سوختی به شدت بر روی قیمت پیل سوختی تاثیر می‌گذارد و از طرفی، افزایش بازده باعث کاهش مصرف سوخت و در نتیجه کاهش هزینه آن می‌شود، این نمودار می‌تواند اطلاعات مفیدی را در خصوص جابه جایی بین این دو گزینه در اختیار تصمیم گیرنده قرار دهد.



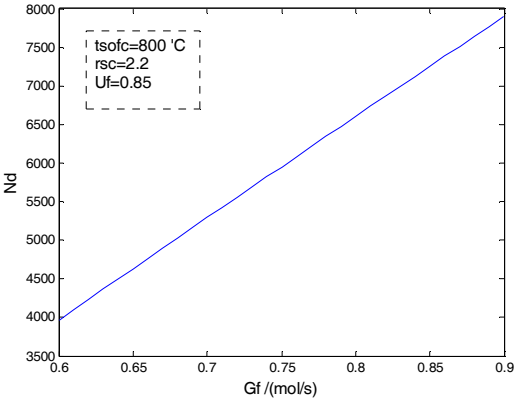
شکل ۲) نمودار بازده الکتریکی سیستم ترکیبی بر حسب تعداد سلول های پیل سوختی

۵-۲- تاثیر دمای گازهای ورودی به میکروتوربین

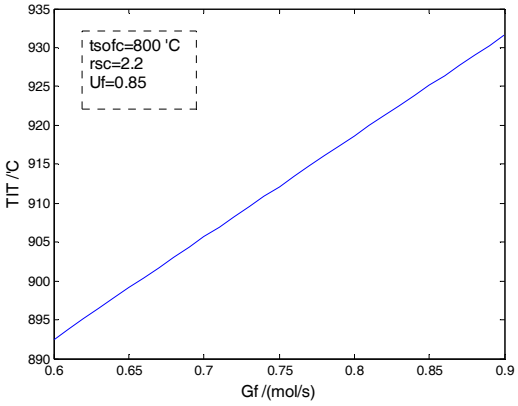
در سیستم ترکیبی SOFC وMGT ، پارامترهای عملیاتی و طراحی هر دو سیستم بر روی یکدیگر اثر می‌گذارد. به طور

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

خاص، TIT میکروتوربین باید به عنوان یک عامل محدود کننده در نظر گرفته شود. ارتباط بین دمای ورودی توربین و دبی سوخت ورودی (متان) در شکل ۳ نشان داده شده است. با افزایش دبی سوخت ورودی، TIT افزایش می‌یابد، زیرا با افزایش دبی سوخت، دما و میزان گازهای احتراقی و واکنش نداده در پیل سوختی بیشتر می‌شود و در این صورت، با احتراق آنها دمای ورودی توربین نیز افزایش خواهد یافت. در حال حاضر، بیشینه TIT برای میکروتوربین‌های تجاری ۹۳۰°C است که می‌توان امیدوار بود با پیشرفت فناوری در زمینه مواد استفاده شده در توربین، بهبود یابد. وقتی TIT بیشینه مقدار خود را دارد و پیل سوختی در همان دمای عملکردی ۸۰۰°C است، بازده سلول برابر ۶۰ درصد است که بیشینه میزان بازده در این تعداد سلول می‌باشد (این شرایط معادل دبی سوخت ورودی بیشینه ۰.۹ mols-۱ و تعداد سلول ۷۹۰۰ می‌باشد). دلیل این امر را می‌توان در نمودار شکل ۵ یافت. در این نمودار، مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد سلول‌ها، چگالی جریان پیل سوختی کاهش می‌یابد در حالی که به صورت همزمان با توجه به نمودار شکل ۴ با افزایش تعداد سلول، دبی سوخت ورودی افزایش می‌یابد. با کاهش چگالی جریان (i)، با توجه به معادله (۱۱)، z نیز که بیانگر میزان هیدروژن مصرفی در پیل سوختی، است کاهش یافته و در نتیجه، سوخت بیشتری وارد میکروتوربین شده و TIT افزایش می‌یابد. همچنین با کاهش چگالی جریان، تمام افت‌های پتانسیل کاهش می‌یابد و در نتیجه، بازده کلی سیستم افزایش خواهد یافت.

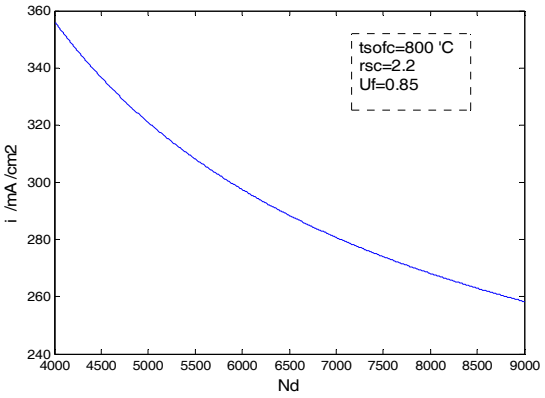


شکل ۳) نمودار دمای ورودی توربین بر حسب دبی سوخت ورودی



شکل ٤) نمودار تعداد سلول های پیل سوختی بر حسب دبی سوخت ورودی

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

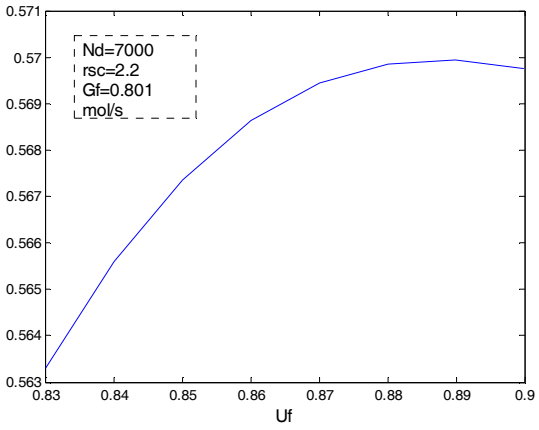


شکل ۵) نمودار چگالی جریان پیل سوختی بر حسب تعداد سلول ها

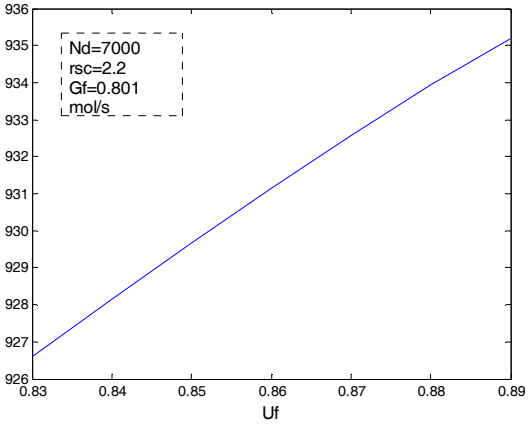
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

۵-۳- تاثیر ضریب مصرف سوخت

نمودار شکل ۶ تاثیر ضریب مصرف سوخت (Uf) را بر عملکرد کلی سیستم ترکیبی نشان می‌دهد. با افزایش Uf، میزان تولید هیدروژن و در نتیجه، دمای عملکردی پیل سوختی بالا می‌رود و بازده الکتریکی کلی سیستم افزایش می‌یابد تا به میزان بیشینه خود در Uf=۰.۸۹ برسد. در ابتدا، با افزایش Uf، مقدار هیدروژن شرکت کننده در واکنش الکتروشیمیایی افزایش می‌یابد، دمای عملکردی پیل سوختی بالا می‌رود و متعاقباً توان تولیدی توسط استک پیل سوختی افزایش می‌یابد. شکل ۷ نیز نشان می‌دهد که با افزایش ۷ درصدی ضریب مصرف سوخت، TIT به اندازه ۱ درصد و به صورت همزمان افزایش می‌یابد. در نتیجه، توان خروجی میکروتوربین نیز به علت افزایش TIT بالا می‌رود و در نتیجه، بازده کلی سیستم افزایش می‌یابد. وقتی Uf بیشتر از میزان حدی خود (۰.۸۹) شود، میزان هیدروژن مصرفی در پیل سوختی به اندازه‌ای افزایش می‌یابد که کاهش ولتاژ خروجی استک ناشی از افزایش چگالی جریان بر میزان افزایش جریان ایجاد شده غلبه می‌کند و لذا توان تولیدی پیل سوختی کاهش می‌یابد. همچنین دبی جرمی سوخت‌های باقیمانده در استک نیز که به عنوان ورودی میکروتوربین هستند، کاهش بیشتری یافته و در نتیجه، این دو عامل، باعث افت بازده کلی سیستم به ازای Uf بیشتر از ۰.۸۹ می‌شود.



شکل ٦) نمودار بازده الکتریکی سیستم ترکیبی بر حسب ضریب مصرف سوخت



شکل ۷) نمودار دمای ورودی توربین بر حسب ضریب مصرف سوخت

۵-۴- تاثیر نسبت بخار به کربن (rSC)

مقدار نسبت بخار به کربن ۲ برای انجام واکنش‌های رفورمینگ متان کافی است، اما به طور معمول، از میزان بخار بیشتری به منظور ممانعت از تولید کربن به سبب واکنش تجزیه حرارتی متان استفاده می‌شود [۱۶]. شکل ۸ تاثیر پارامتر rSC را بر روی عملکرد کلی سیستم ترکیبی نشان می‌دهد. وقتی rSC افزایش می‌یابد، بازده کلی سیستم کاهش می‌یابد.

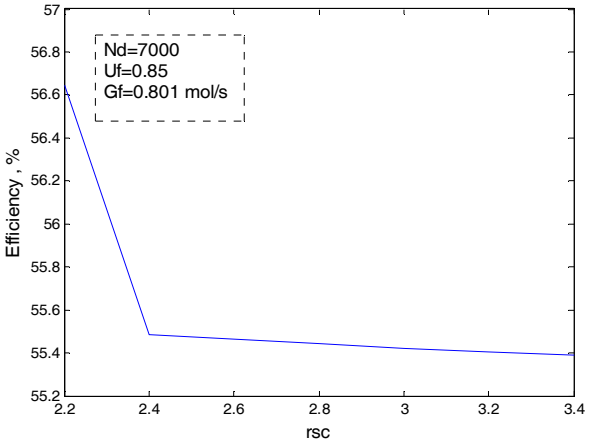
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

زیرا با افزایش rSC، فشار جزیی بخار در استک افزایش یافته و در عین حال، فشار جزیی هیدروژن کاهش می‌یابد. بنابراین، هم ولتاژ عملکردی استک و هم دمای عملکردی آن کاهش می‌یابد و به طور کلی، توان خروجی از SOFC کاهش می‌یابد. اگرچه با افزایش rSC دبی گازهای ورودی به میکروتوربین افزایش می‌یابد و این عامل باعث افزایش توان خروجی میکروتوربین می‌شود، اما از آنجایی که در اینجا بازده و توان پیل سوختی نسبت به میکروتوربین بیشتر است، تاثیر نهایی و کلی افزایش rSC، کاهش بازده کلی سیستم می‌باشد. می‌توان شکست ایجاد شده در rSC=۲.۴ را اینگونه تفسیر کرد که در این نقطه، توان تولید شده در میکروتوربین به اندازه‌ای افزایش یافته که تأثیر کاهش بازده پیل سوختی بر روی کاهش بازده کلی، کمتر نمایان می‌شود و شیب نمودار کاهش می‌یابد.

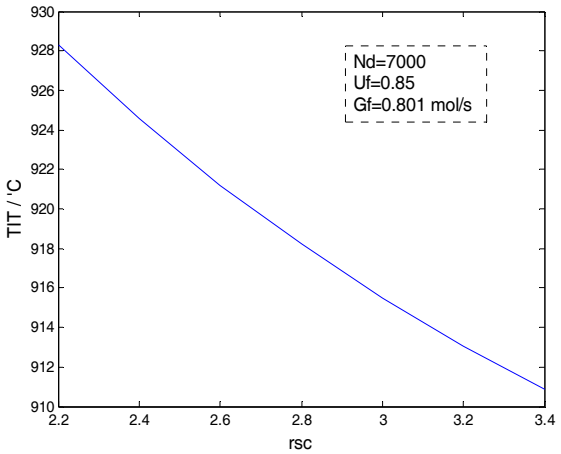
نمودار شکل ۹ تاثیر rSC را بر روی TIT نشان می‌دهد. با افزایش rSC، دمای گازهای ورودی به میکروتوربین کاهش می‌یابد، که این کاهش به صورت کلی ناشی از دو علت می‌باشد:

۱- با افزایش rSC، دمای استک پایین می‌آید و در نتیجه، با کاهش دمای گازهای ورودی به محفظه احتراق، TIT کاهش می‌یابد.

۲- از طرف دیگر، افزاش بخار باعث می‌شود سهم گازهای قابل اشتعال در محفظه احتراق کاهش یابد که در نتیجه، کاهش TIT را به دنبال خواهد داشت.



شکل ۸) نمودار بازده الکتریکی سیستم ترکیبی بر حسب نسبت بخار به کربن



شکل ۹) نمودار دمای ورودی توربین بر حسب نسبت بخار به کربن

۵-۵- اثر اعمال مدیریت حرارتی

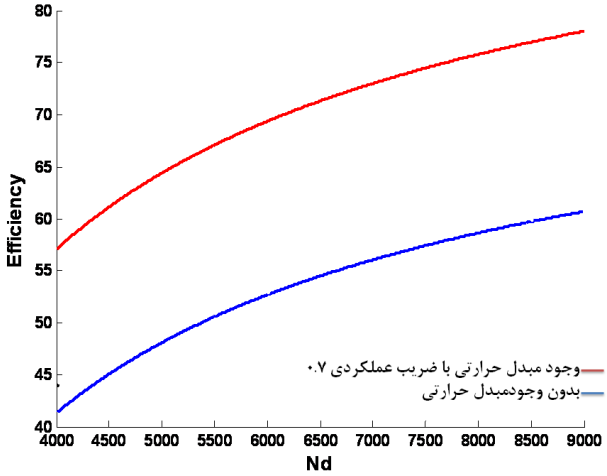
دمای هوا و سوخت ورودی به استک می‌بایستی تا حد معینی بالا باشد تا انرژی لازم جهت تأمین حرارت سلول و واکنش‌های احیاء تأمین شود. در صورت نبود مبدل حرارتی، این حرارت باید توسط یک منبع خارجی تامین شود. با در نظر

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

گرفتن یک مبدل حرارتی با ضریب عملکردی ۰.۷ بر سر راه هوا و سوخت خروجی از کمپرسور، حرارت مورد نیاز برای پیش‌گرم کردن هوا و سوخت ورودی به استک پیل سوختی از طریق خود سیستم و با استفاده از گازهای خروجی از توربین تامین می‌شود. با در نظر گرفتن مبدل حرارتی هوا، دمای هوای خروجی از کمپرسور را می‌توان تا اندازه T۳ بالا برد که میزان آن از طریق معادله (۲۹) به دست خواهد آمد.

$$T_{۳} = T_{۲} + \varepsilon(T_{Exh} - T_{۲}) \quad (۲۹)$$

این معادله را می‌توان برای پیش گرم کردن سوخت و همچنین تولید بخار از طریق حرارت گازهای خروجی از مبدل حرارتی ابتدایی تکرار کرد. در نتیجه، این کار باعث بهبود عملکرد کلی و بازده الکتریکی سیستم ترکیبی به طور چشمگیری (به طور میانگین ۳۰.۹ درصد) می‌شود. تاثیر اعمال مدیریت حرارتی بر بازده الکتریکی کلی سیستم ترکیبی در ظرفیت‌های مختلف پیل سوختی را می‌توان در نمودار شکل ۱۰ مشاهده کرد.



شکل ۱۰) مقایسه نمودارهای بازده الکتریکی سیستم ترکیبی بر حسب تعداد سلول‌های پیل سوختی، در حالت استفاده از مبدل حرارتی و در حالت عدم وجود آن

۶- نتیجه گیری

در مقاله حاضر، مدل سیستم تولید توان ترکیبیSOFC-MGT ارائه شده است. تأثیر ظرفیت پیل سوختی (تعداد سلول‌های آن) و سایر پارامترهای کلیدی سیستم بر روی عملکرد کلی سیستم ترکیبی مورد بررسی قرار گرفته است. تأثیر پارامترهای اصلی سیستم ترکیبی SOFC-MGT با در نظر گرفتن TIT به عنوان یک شرایط محدود کننده، ارائه شده‌اند. همچنین در انتها، تأثیر مدیریت حرارتی در بازیابی حرارت گازهای خروجی از میکروتوربین، برای تأمین حرارت مورد نیاز جهت پیش گرم کردن هوا و سوخت و همچنین تولید بخار مورد نیاز برای واکنش‌های احیای متان داخل پیل سوختی، مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهند که با حضور مدیریت حرارتی، بازده الکتریکی کلی سیستم ترکیبی ۱۷/۸

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

درصد افزایش می‌یابد. مهمترین نتایج پروژه به صورت زیر می‌باشد:

۱–دمای گازهای ورودی توربین یکی از مهمترین پارامتر های اثرگذار بر عملکرد سیستم می‌باشد که افزایش بیشتر بازده الکتریکی سیستم ترکیبی را محدود می‌کند.

۲– وقتی دمای عملکردی پیل سوختی ثابت است، با افزایش تعداد سلول‌ها و دبی سوخت ورودی، بازده تولید توان و TIT هر دو افزایش می‌یابد. نتایج پیش بینی می‌کنند که در ابتدا، با افزایش تعداد سلول‌ها (۵۵۰۰–۴۰۰۰)، بازده کلی سیستم افزایش چشمگیری می‌یابد، در حالی که در انتهای نمودار و در تعداد سلول‌های بالاتر (۹۰۰۰–۷۵۰۰)، افزایش تعداد سلول‌ها تأثیر کمتری بر روی افزایش بازده داشته و در نهایت، در تعداد سلول‌های بالاتر، بازده به میزان حدی خود خواهد رسید و از آن پس، افزایش تعداد سلول ها نه تنها تأثیری بر بازده نخواهد داشت، بلکه هزینه سیستم را نیز بالا خواهد برد.

۳– افزایش ضریب مصرف سوخت یک روش موثر برای افزایش عملکرد سیستم ترکیبی است که آن نیز دارای یک مقدار حدی می‌باشد (Uf=۰.۸۹) و از این مقدار به بعد، بازده سیستم با افزایش این پارامتر، کاهش می‌یابد. این پارامتر می‌تواند بازده الکتریکی سلول را افزایش دهد، اما به طور همزمان باعث افزایش TIT می‌شود که این پارامتر با توجه به فناوری موجود محدود می‌شود.

۴– افزایش نسبت بخار به کربن باعث کاهش بازده الکتریکی کلی سیستم و همچنین TIT می‌شود.

فهرست علائم

A	مساحت فعال سلول (cm^2)	P_{O_2}	فشار جزئی اکسیژن در سمت هوا (Pa)
C_P	ظرفیت گرمایی در فشار ثابت ($J\ mol^{-1}\ K^{-1}$)	Q_{loss}	گرمای اتلافی استک پیل سوختی(kW)
d	ضخامت (cm)	R	ثابت گازها ($J\ K^{-1}\ mol^{-1}$)
F	ثابت فارادی، $C\ mol^{-1}$ ۹۶۴۸۷	r_k	دبی مولی واکنش دهنده k , ($mol\ s^{-1}$)
G_f	دبی جریان سوخت ($mol\ s^{-1}$)	r_{SC}	نسبت بخار به کربن
H	آنتالپی ($KJ\ mol^{-1}$)	SOFC	پیل سوختی اکسید جامد
i	چگالی جریان ($mA\ cm^{-2}$)	t	دما (°C)
$i_{a.}$	چگالی جریان تبادلی آند ($mA\ cm^{-2}$)	T	دما (°K)
$i_{c.}$	چگالی جریان تبادلی کاتد ($mA\ cm^{-2}$)	T_1	دمای ورودی کمپرسور (°K)
i_L	چگالی جریان حدی ($mA\ cm^{-2}$)	T_2	دمای خروجی کمپرسور (°K)
K_p	ثابت تعادل شیمیایی	T_3	دمای خروجی از مبدل حرارتی (°K)
K_{pr}	ثابت تعادل واکنش رفورمینگ	T_4	دمای خروجی توربین (°K)
K_{ps}	ثابت تعادل واکنش آب–گاز شیفت	TIT	دمای ورودی توربین(°K)
l	قطر سلول (cm)	T_{Exh}	دمای گازهای خروجی از توربین (□K)
LHV	ارزش حرارتی پایین سوخت ($KJ\ Kg^{-1}$)	U_f	ضریب مصرف سوخت
MGT	میکروتوربین گازی	V	ولتاژ سلول (V)
n_e	تعداد الکترون‌های منتقل شده در هر واکنش	w_{AC}	کار مخصوص کمپرسور ($kJ\ kg^{-1}$)
$n_{CH_4}^{in}$	دبی مولی سوخت ورودی ($mol\ s^{-1}$)	w_{GT}	کار مخصوص توربین ($kJ\ kg^{-1}$)
$n_{H_2O}^{in}$	دبی مولی آب ورودی به پیل سوختی ($mol\ s^{-1}$)	W	توان(kW)

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

$n_{H_2}^{r}$	دبی مولی هیدروژن واکنش دهنده ($mol\ s^{-1}$)	x	دبی مولی متان واکنش دهنده($mol\ s^{-1}$)
$n_{H_2}^{tot}$	دبی مولی هیدروژن تولید شده در دو واکنش ($mol\ s^{-1}$)	y	دبی مولی کربن مونوکسید واکنش دهنده($mol\ s^{-1}$)
n_{H_2O}	دبی مولی بخاری که با متان واکش می‌دهد ($mol\ s^{-1}$)	z	دبی مولی هیدروژن واکنش دهنده ($mol\ s^{-1}$)
n_{CH_4}	دبی مولی متان ($mol\ s^{-1}$)	ΔH_K	آنتالپی مولی واکنش دهنده k,($kJ\ mol^{-1}$)
N_d	تعداد سلول‌ها	$\Delta G^{\cdot}$	انرژی آزاد گیبس در شرایط پیل سوختی ($kJ\ mol^{-1}$)
P	فشار(Pa)	**حروف یونانی**	
$P_{\cdot}$	فشار استاندارد (Pa)	β	ضریب انتقال
P_1	فشار ورودی کمپرسور (Pa)	η_{AC}	بازده کمپرسور
P_2	فشار خروجی کمپرسور(Pa)	η_{GT}	بلزده توربین
P_3	فشار ورودی توربین(Pa)	η_{total}	بازده الکتریکی سیستم ترکیبی
P_4	فشار خروجی توربین (Pa)	η_{DA}	بازده تبدیل کننده DC/AC
P_{sofc}	فشار عملکردی سیستم پیل سوختی(Pa)	**زیرنویس**	
P_{H_2}	فشار جزئی هیدروژن در سمت سوخت(Pa)	a	آند
P_{H_2O}	فشار جزئی آب در سمت سوخت (Pa)	c	کاتد

مراجع

[۱] Morgantown, W. V. (۲۰۰۳).“EG&G Technical Services Fuel cell handbook”.US Department of Energy.

[۲] Litzinger, K. P. “Comparative evaluation of SOFC gas turbinehybrid options”. Proc.Int. ASMETurbo ExpoConference, Reno, NV, June ۲۰۰۵.

[۳] Calise, F., Palombo, A., Vanoli, L. “Design and partial loadexergy analysis of hybrid SOFC-GT power plant”. J Power Sources, Vol. ۱۵۸, pp. ۲۲۵-۲۴۴, ۲۰۰۶.

[۴] Santin, M., Traverso, A., Magistri, L., Massardo, A. F. “Thermoeconomic analysis of SOFC–GT hybrid systems fed by liquid fuels”. Energy, Vol. ۳۵, pp. ۱۰۷۷-۱۰۸۳, ۲۰۱۰.

[۵] Cheddie, D., Murray, R. “Thermo-economic modeling of an indirectly coupled solid oxide fuel cell/gas turbine hybrid power plant”. J Power Sources,Vol. ۱۹۵, pp. ۸۱۳۴-۸۱۴۰, ۲۰۱۰.

[۶] Bao, C., Shi, Y., Li, C., Cai, N., Su, Q. “Multi-level simulation platform of SOFC-GT hybrid generation system”. Int J Hydrogen Energy,Vol. ۳۵, pp. ۲۸۹۴-۹, ۲۰۱۰.

[۷] Zhang, X., Chan, S. H., Li, G., Ho, H. K., Li, J., Feng, Z. “A review ofintegration strategies for solid oxide fuel cells”. J PowerSourcesVol. ۱۹۵, pp. ۶۸۵-۷۰۲, ۲۰۱۰.

[۸] Traverso, A., Pascenti, M., Ferrari, M. L.,Bertone, R., Magistri, L. (۲۰۰۷).“Hybrid simulation facility based on commercial ۱۰۰ kWe micro-gas turbine”.Proc. of the ASME Fuel Cell Conference, Irvine, CA.

[۹] Agnew, D. G. (۲۰۰۵).“The design and integration of the Rolls Royce fuel cell systems ۱MW

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

SOFC.” In: Proc. of the ASME Turbo Expo Conference, Reno, NV.

[۱۰] Arsalis, A. M. “Thermoeconomic modeling and parametric study of hybrid SOFCe gas turbine steam turbine power plants ranging from ۱.۵ to ۱۰ MWe.”J Power SourcesVol. ۱۸۱, pp. ۳۱۳-۲۶, ۲۰۰۸.

[۱۱] Mueller, F., Gaynor, R., Auld, A. E., Brouwer, J., Jabbari, F., Samuelsen, G. S. “Synergistic integration of a gas turbine and solid oxid fuel cell for improved transient capability.” Jornal of Power SourcesVol. ۱۷۶, No. ۱, pp. ۲۲۹-۲۳۹, ۲۰۰۸.

[۱۲] Yang, J. S., Sohn, J. L., Ro, S. T. “Performance characteristics of a solid oxide fuel cell/gas turbine hybrid system whith various part-load control modes.”Jornal of Power SourcesVol. ۱۶۶, No. ۱, pp. ۱۵۵-۱۶۴, ۲۰۰۷.

[۱۳] Calise, F., Dentice, A. M., Palombo, A., Vanoli, L. “Simulation and exergy analysis of a hybrid solid oxid fuel cell (SOFC)-gas turbine system.”EvergyVol. ۳۱, No. ۱۵, pp. ۳۲۷۸-۳۲۹۹, ۲۰۰۶.

[۱۴] Lai, W. H., Hsiao, C. A., Lee, C.H., Chyou, Y. P., Tsai, Y. C. “Experimental simulation on the integration of solid oxide fuel cell and micro-turbine generation system.” Jornal of Power Sources Vol. ۱۷۱, No. ۱, pp. ۱۳۰-۱۳۹, ۲۰۰۷.

[۱۵] Duan, L., He, B., Yang, Y. “Parameter optimization study on SOFC-MGT hybridpower system.”International Journal of Energy Rresearch, Vol. ۳۵, pp. ۷۲۱-۷۳۲, ۲۰۱۱.

[۱۶] He, Y. M.,Zou, J. T.,Zhang, Y. Y. “Abrif introduction to several new plant layouts of fuel cell and gas turbine combined cycle.”Shanghai Turbine Vol. ۳, pp. ۲۹-۳۴, ۲۰۰۱.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]